



# 祁连山东段干旱草原 2 种群落 物种构成及稳定性研究

赵 敏, 徐文兵, 孔杨云, 王先之, 于应文\*

(兰州大学 草地农业科技学院, 兰州 730020)

**摘 要:** 芨芨草作为干旱、半干旱草原建群种, 其群落植被构成和稳定性影响草原荒漠化程度, 研究其群落物种构成及稳定性, 可表征草原演替动态和发展方向。该研究以甘肃天祝松山滩干旱草原芨芨草群落和针茅群落为对象, 定量分析其群落物种组成和多样性、功能群生物量构成、Raunkiaer 频度和种间 Spearman 秩相关, 探究物种构成和种间关联与群落稳定性的关系。结果表明: (1) 针茅群落物种多样性较芨芨草群落丰富, 其物种更替程度相近。(2) 2 个群落均处于退化状态, 随退化程度加剧, 丛生禾草和杂类草分别占据芨芨草群落和针茅群落主要地位。(3) 2 个群落主要植物种对的正负关联比皆小于 1, 其植物种间联结性松散, 群落稳定性较低。(4) 高物种多样性不利于针茅群落稳定。研究认为, 群落功能群构成及其均匀度和干旱扰动比多样性对群落稳定性影响更大。

**关键词:** 芨芨草群落; 针茅群落; 物种多样性; 功能群; Raunkiaer 频度系数; Spearman 秩相关

**中图分类号:** Q948. 15<sup>+</sup>4 **文献标志码:** A

## Research on the Vegetation Composition and Community Stability of Arid Grassland in the East of Qilian Mountains

ZHAO Min, XU Wenbing, KONG Yangyun, WANG Xianzhi, YU Yingwen\*

(College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou 730020, China)

**Abstract:** *Achnatherum splendens* is a constructive species in arid or semi-arid grassland, vegetation composition and community stability of its community can affect the desertification degree of grassland, which represents successional dynamics and development direction of community. The aims of this study is to explore the relationship between vegetation composition, interspecific association and community stability by analyzing the composition, and diversity of species, functional group biomass composition, Raunkiaer frequency coefficient, and Spearman rank correlation of *A. splendens* and *Stipa* communities in Songshantan grassland in Gansu Tianzhu. The results indicated that, (1) the species diversity of *Stipa* community was richer than that of *A. splendens* community, and the degree of species replacement was similar in these two communities. (2) The two communities were degraded, with the grassland degradation increased, *A. splendens* and *Stipa* communities dominated by grasses and forbs, respectively. (3) The positive to negative association ratio of species-pairs in two communities was less than one, and the interspecific association was loose, and they had a low community stability. (4) The high species diversity was not benefit for the stability of *Stipa* community. The study suggests that biomass composition of functional group, evenness of species and drought disturbance had higher effects on the community stability than that of the spe-

收稿日期: 2017-05-24; 修改稿收到日期: 2017-08-10

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0501902)

作者简介: 赵 敏(1993—), 女, 在读硕士研究生。E-mail: zhaom2016@lzu.edu.cn

\* 通信作者: 于应文, 副教授, 硕士生导师, 主要从事草地生态学研究。E-mail: yuyw@lzu.edu.cn

cies diversity.

**Key words:** *Achnatherum splendens* community; *Stipa* community; diversity; functional group; Raunkiaer frequency coefficient; Spearman rank correlation

草地群落稳定性指其受干扰后维持原结构和功能状态、抵抗干扰或恢复到原状态的能力<sup>[1]</sup>,随环境胁迫和人为干扰加剧,草地群落面临稳定性差、生长不良和功能衰退等问题<sup>[2-3]</sup>。因此,群落稳定性是草地生态学主要研究内容之一。

研究表明,植物功能群组成影响群落稳定性<sup>[4]</sup>。草地群落生活型成分中多年生根茎和丛生型禾草和杂类草,或生态型成分中旱生和中旱生植物间的补偿作用,及多年生植物优势度的增加,均能维持受干扰群落相对稳定性<sup>[4-5]</sup>;而草地群落演替顶极成分中增加种和入侵种比例的相对增大,不利于群落稳定性的维持<sup>[6]</sup>。且草地群落稳定性也因杂类草、禾草和莎草对外界干扰的敏感性差异而不同<sup>[7]</sup>。研究也表明,草原物种多样性与群落稳定性关系具有尺度性<sup>[8]</sup>,物种多样性增加提高群落稳定性<sup>[9-10]</sup>或对群落稳定性无影响<sup>[11]</sup>;且群落稳定性维持依赖于共有物种多样性增加,而响应和作用物种多样性增加不影响群落稳定性<sup>[12]</sup>。此外,植物种间关系亦影响草地群落稳定性,通常群落中正关联物种对比越高,其群落越趋于稳定<sup>[13-14]</sup>。因此,群落物种构成、物种多样性和种间关系变化特征均是影响草地群落稳定性的重要因素。

以往草地群落稳定性与物种构成、物种多样性和种间关系互作研究,集中于高寒草甸、荒漠草原、典型草原上<sup>[15-17]</sup>,结果均表明在研究群落稳定性时,应同时考虑物种构成,而干旱草原群落稳定性研究限于物种多样性或种间关联单项研究<sup>[18-19]</sup>,关于群落稳定性与物种构成和种间关系等的整合研究相对缺乏。基于此,本研究以祁连山东段松山滩干旱草原芨芨草群落和针茅群落为对象,对群落物种构成、物种多样性、功能群生物量构成、物种 Raunkiaer 频度分布和种间关系及群落演替度定量测定,明晰物种构成、物种多样性和种间关联与群落稳定性的关系,以揭示干旱草原群落演替的生态学机制,为干旱草地植被恢复和稳定性维持提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验地概况

试验区位于祁连山东段的甘肃省天祝县松山滩草原的芨芨草 (*Achnatherum splendens*) 和针茅

(*Stipa* sp.) 群落草地上,地理坐标为 E102°40′~102°47′, N37°11′~37°14′。年均气温 -0.1 °C, 1 月均温 -18.3 °C, 7 月均温 12.7 °C, >0 °C 积温 1 380 °C; 年降水量 416 mm, 无绝对霜期, 仅分冷热两季, 土壤类型为亚高山草甸土。草地主要植物种有芨芨草、山韭 (*Allium sikkimense*)、大籽蒿 (*Artemisia sieversiana*)、针茅、赖草 (*Aneurolepidium dasystachys*)、紫菀 (*Aster alpines*)、冰草 (*Agropyron cristatum*)、二裂委陵菜 (*Potentilla bifurca*)、独行菜 (*Lepidium apetalum*) 等。草地常年放牧绵羊。

### 1.2 样地设置

2010 年 7 月初,在研究区选择盖度比例小于 45% 的芨芨草群落 (*Achnatherum splendens* community) 和针茅群落 (*Stipa* community) 各 7 个样地,每个样地草地面积 13~25 hm<sup>2</sup>。

### 1.3 测定指标与方法

**1.3.1 草地群落构成特征** 2010 年 7 月初~8 月中下旬,在各样地内随机设置 5 个 0.50 m × 0.50 m 样方,测定各样方内草层及所有植物种的高度、密度、盖度、物种数和群落中各植物种在样方中出现的次数,并齐地刈割收获地上生物量,然后将其按绿色物质(活物质)和死物质分开,再将绿色物质按不同植物种分开,于 65 °C 下烘干称重,测定分种生物量。

重要值是某个种在群落中的地位和作用的数量指标,其数值大小可反映群落中物种优势程度。基于样方调查数据,用  $IV = (RH + RF + RC + RD) / 4$  计算物种重要值;其中,  $IV$  (important value) 为物种重要值,  $RH$ 、 $RF$ 、 $RC$  和  $RD$  分别为植物种的相对高度(样方内某植物种高度/样方内所有植物种高度之和)、相对频度(样方内某植物种频度/样方内所有植物种频度之和)、相对盖度(样方内某植物种盖度/样方内所有植物种盖度之和)和相对密度(样方内某植物种密度/样方内所有植物种密度之和)。

$\alpha$  多样性指某个群落或生境内部种的多样性,其反映群落内部物种丰富度; $\beta$  多样性是指沿环境梯度不同生境群落之间物种组成的相异性或物种沿环境梯度的更替速率,其反映群落之间物种多样性。

本研究以样方调查数据为准,由公式  $D_{Gl} = \frac{S}{\ln A}$ 、 $D_{Mc} = \frac{S-1}{\ln N}$ 、 $D_{Mc} = \frac{S}{N^{0.5}}$ 、 $D_{Mb} = \frac{S}{N}$  和  $\beta_w = \frac{S}{m_a} - 1$  分别计

算  $\alpha$  多样性指数  $D_{GI}$  (Gleason 指数)、 $D_{Ma}$  (Margalef 指数)、 $D_{Mc}$  (Menhinick 指数)、 $D_{Mo}$  (Monk 指数) 和  $\beta$  多样性指数  $\beta_w$  (Whittaker 指数)。式中  $S$  为样方的物种数,  $N$  为全部种的个体总数,  $A$  为样方面积,  $m_a$  为各样方的平均物种数<sup>[20]</sup>。

**1.3.2 功能群生物量构成** 功能群是具有相似结构或功能的对特定环境因素有相似反应的一类物种(分类群)。采用经济类群和演替顶极成分 2 种方法对草地群落植物种功能群生物量构成进行分析。其中, 经济类群分为禾草、莎草、豆科、杂类草和不可食植物, 演替顶极成分分为增加种、降低种和入侵种 3 类<sup>[6]</sup>。

**1.3.3 草地 Raunkiaer 频度** 频度即群落中某种植物出现的样方数占整个样方数的百分比, C. Raunkiaer 将频度分 5 级, A(级) = 1% ~ 20%、B(级) = 21% ~ 40%、C(级) = 41% ~ 60%、D(级) = 61% ~ 80%、E(级) = 81% ~ 100%。通常样方内各频度等级植物种数占总物种数比例关系为 A 级 > B 级 > C 级  $\geq$  或  $\leq$  D 级 < E 级<sup>[6]</sup>。Raunkiaer 频度直方图作为群落成熟度和稳定性的重要指标, 其越接近反 J 型, 表示群落越成熟稳定, 越趋于顶极阶段。

草地演替度(degree of succession,  $DS$ )用公式  $DS = \frac{\sum(e \times d)}{N} \cdot \mu$  计算<sup>[6]</sup>。式中,  $e$  为植物种寿命;  $d$  为植物种优势度(重要值),  $N$  为各重复样地内群落总物种数,  $\mu$  为植被率。  $DS$  越大, 群落越趋于顶极阶段。

**1.3.4 植物种间 Spearman 秩相关分析** 在 SPSS 16.0 中 Correlate 的 Bivariate 模块中, 利用植物种重要值计算两群落主要植物种间 Spearman 秩相关系数及显著性, 并分析群落主要植物种间关系, 以探讨两种群落的相对稳定性<sup>[21]</sup>。

1.4 数据分析

用 Excel 进行数据处理及制图, SPSS16.0 软件的 One-Way ANOVA 对两群落植被构成、物种丰富度指数及功能群生物量特征进行方差分析(F-检验)和显著性检验, 并将数据表示为均值  $\pm$  标准误。

2 结果与分析

2.1 两种群落主要植物种重要值

植物种重要值结果显示, 芨芨草群落以及芨芨草与针茅为优势种和亚优势种, 伴生种有大籽蒿、冰草、赖草、白花枝子花、紫菀、委陵菜等; 针茅群落以针茅和芨芨草为优势种和亚优势种, 伴生种有冰草、赖草、紫菀、冷蒿、大籽蒿、紫菀、茵陈蒿、矮生嵩草等

(表 1)。芨芨草群落中的芨芨草、赖草、冰草等的重要值是白花枝子花、紫菀等的 2 倍; 针茅群落中禾草与其他植物的重要值相近, 而前者的芨芨草重要值较大。

2.2 群落特征

芨芨草群落高度( $18.69 \pm 1.12$ )高于针茅群落( $6.97 \pm 0.89$ ) ( $P < 0.01$ ), 而盖度和地上生物量在两群落之间差异不显著 ( $P > 0.05$ )。物种  $D_{Ma}$  和  $D_{Mc}$  均为芨芨草群落低于针茅群落 ( $P < 0.05$ ),  $D_{Mo}$  指数前者低于后者 ( $P < 0.01$ ), 而物种数、 $D_{GI}$  和  $\beta_w$  指数在两群落之间差异不显著(表 2)。可见, 针茅群落物种多样性较芨芨草群落丰富, 前者物种组成较后者复杂, 两群落物种更替程度相近。

2.3 群落功能群生物量构成

两群落经济类群生物量构成差异表现在禾草与杂类草, 其中芨芨草群落的禾草生物量比例(54.5%)高于针茅群落(36.1%) ( $P < 0.05$ ), 而其杂类草比例(24.3%)低于针茅群落(35.3%) ( $P < 0.05$ ), 莎草、豆科和不可食草植物比例在两群落之间差异不显著 ( $P > 0.05$ ) (图 1, a)。演替顶极成分生物量构成为, 芨芨草群落的增加种(76.5%)比例高于针茅群落(51.41%) ( $P < 0.01$ ), 且前者是后者的

表 1 主要植物种重要值( $IV \geq 0.02$ )  
Table 1 The important values of main plant species in two communities

植物种名(编号) Species(Code)	芨芨草群落 <i>A. splendens</i> community	针茅群落 <i>Stipa</i> community
芨芨草 <i>Achnatherum splendens</i> (Asp)	0.34 $\pm$ 0.02	0.12 $\pm$ 0.06
针茅 <i>Stipa</i> sp. (Sp)	0.12 $\pm$ 0.02	0.21 $\pm$ 0.04
大籽蒿 <i>Artemisia sieversiana</i> (As)	0.08 $\pm$ 0.01	0.04 $\pm$ 0.02
扁穗冰草 <i>Agropyron cristatum</i> (Ac)	0.07 $\pm$ 0.02	0.06 $\pm$ 0.03
赖草 <i>Aneurolepidium dasystachys</i> (Ls)	0.07 $\pm$ 0.01	0.05 $\pm$ 0.04
白花枝子花 <i>Dracocephalum heterophyllum</i> (Dh)	0.04 $\pm$ 0.01	0.03 $\pm$ 0.01
紫菀 <i>Aster alpines</i> (Aa)	0.03 $\pm$ 0.01	0.04 $\pm$ 0.01
委陵菜 <i>Potentilla chinensis</i> (Pc)	0.02 $\pm$ 0.01	0.02 $\pm$ 0.01
黄芪 <i>Astragalus membranaceus</i> (Am)	0.02 $\pm$ 0.01	0.03 $\pm$ 0.01
鸢尾 <i>Iris tectorum</i> (It)	0.02 $\pm$ 0.01	0.06 $\pm$ 0.03
二裂委陵菜 <i>P. bifurca</i> (Pb)	0.02 $\pm$ 0.01	
瑞香狼毒 <i>Stellera chamaejasme</i> (Sc)	0.02 $\pm$ 0.01	0.07 $\pm$ 0.02
益母草 <i>Leonurus artemisia</i> (Ls)	0.02 $\pm$ 0.01	
高山韭 <i>Allium sikkimense</i> (Asi)	0.02 $\pm$ 0.03	0.02 $\pm$ 0.02
茵陈蒿 <i>Artemisia capillaries</i> (Ac)	0.03 $\pm$ 0.02	
矮蒿草 <i>Kobresia humilis</i> (Kh)	0.03 $\pm$ 0.02	
伏毛山莓草 <i>Sibbaldia adpressa</i> (Sa)	0.03 $\pm$ 0.01	
冷蒿 <i>Artemisia frigida</i> (Af)	0.02 $\pm$ 0.01	0.05 $\pm$ 0.02
点地梅 <i>Androsace umbellate</i> (Au)	0.02 $\pm$ 0.01	

表 2 2 种群落物种多样性指数  
Table 2 The species diversity indexes of two communities

群落类型 Type of community	物种数 Number of species	Gleason 指数 $D_{GI}$	Margalef 指数 $D_{Ma}$	Menhinick 指数 $D_{Me}$	Monk 指数 $D_{Mo}$	Whittaker 指数 $\beta_w$
芨芨草群落 <i>A. splendens</i> community	9.49±0.26	42.19±1.18	2.76±0.09 *	2.06±0.06 *	0.45±0.19 * *	1.12±0.03
针茅群落 <i>Stipa</i> community	9.94±0.34	44.56±1.53	3.05±0.10	2.29±0.06	0.54±0.02	1.11±0.04

注：\* 和 \* \* 分别表示两群落间指标差异达显著( $P<0.05$ )和极显著水平( $P<0.01$ )。下同  
Note: \* and \* \* represent the significant difference between the two community at 0.05 level and 0.01 level, respectively. The same as below

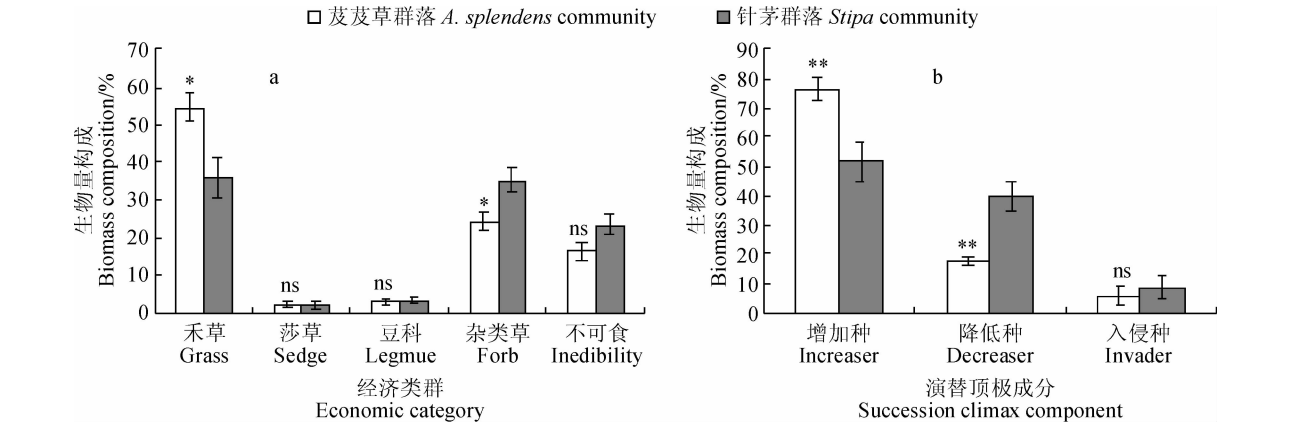


图 1 2 种草原群落经济类群(a)及演替顶极成分(b)生物量构成

Fig. 1 Biomass composition of economic category(a) and succession climax component(b) of two communities

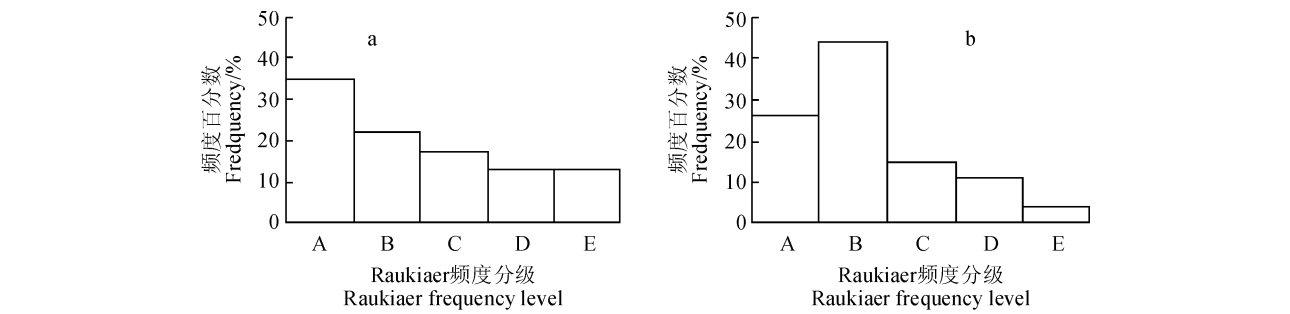


图 2 芨芨草群落(a)和针茅群落(b)物种 Raunkiaer 标准频度分布

A. 1%—20%; B. 21%—40%; C. 41%—60%; D. 61%—80%; E. 81%—100%

Fig. 2 Standard frequency histogram of different communities

1.5~1.6 倍;而其降低种比例为针茅群落(39.9%)高于芨芨草群落(17.7%)( $P<0.01$ ),后者为前者的 1.4~2.3 倍;2 种群落的入侵种比例相近( $P>0.05$ )(图 1,b)。说明,芨芨草群落较针茅群落退化程度高。

2.4 草地 Raunkiaer 标准频度分布及演替度

演替度值结果为,芨芨草群落( $43.91\pm5.23$ )<针茅群落( $48.56\pm8.92$ )( $P>0.05$ ),说明两群落均处于退化阶段。两群落的 Raunkiaer 标准频度直方图均不呈反 J 型,且芨芨草群落和针茅群落的 A 级分别为 35%和 26%,E 级为 13%和 4%,A 级和 E

级比值分别为 2.7 和 6.5(图 2)。说明两群落均受严重干扰而处于不稳定或不成熟状态,芨芨草群落内部物种分布较均匀,其比针茅群落稳定。

2.5 两种群落主要物种种间关联

Spearman 秩相关分析显示,芨芨草群落和针茅群落负相关种对数均多于正相关种对数,两者负相关种对分别占各自总种对数的 57.1%和 52.1%,正相关种对数分别占各自总种对数的 41.9%和 42.6%,正负关联比分别为 0.73 和 0.76(图 3)。芨芨草群落和针茅群落显著或极显著正关联和负关联的种对比例均小于 1%。说明两种群落种间联结性

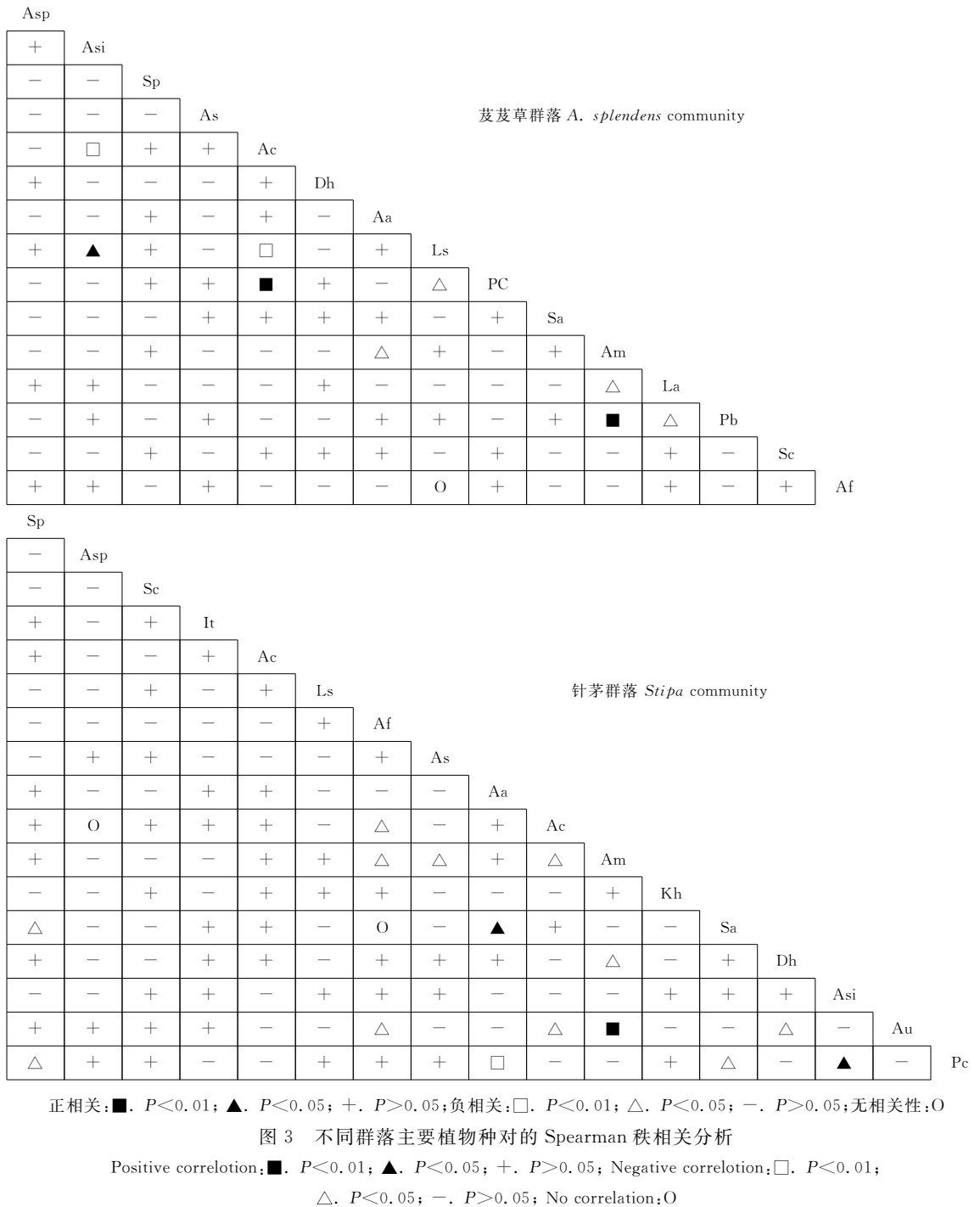


Fig. 3 Spearman rank correlation analysis of main species in different communities

松散,物种之间相对独立,群落处于演替阶段,稳定性较低。芨芨草群落中,极显著负相关种对为冰草与高山韭、赖草;显著负相关种对有有益母草与黄芪、二裂委陵菜,以及紫菀与黄芪、赖草与委陵菜;显著正相关种对为冰草与委陵菜、二裂委陵菜与黄芪。针茅群落中,紫菀与委陵菜极显著负相关;显著负相关种对有针茅与矮嵩草、委陵菜,冷蒿与黄芪、茵陈蒿、点地梅等,白花枝子花与黄芪、点地梅,伏毛山莓

草与委陵菜等;黄芪与点地梅极显著正相关;显著正相关种对有紫菀与伏毛山莓草,高山韭与委陵菜(表3)。说明,两群落优势种芨芨草和针茅与其他植物的关联性弱,而其伴生种与亚优势种或伴生种与伴生种之间的联结性较强。

### 3 讨 论

通常,受干扰或严重退化的群落物种多样性

低<sup>[22-23]</sup>,本研究结果与之一致。本研究中,芨芨草群落较针茅群落退化程度大,具有较低 $\alpha$ 多样性,但两群落 $\beta_w$ 相近;这是因为 $\beta_w$ 是群落物种丰富度与样方平均物种数比值,它独立于 $\alpha$ 多样性;故 $\alpha$ 多样性低的群落其 $\beta_w$ 不一定低<sup>[24]</sup>。本研究两种群落物种多样性有差异,一方面,由于针茅群落中适口差的蒿类等较多,受放牧干扰小,能维系较高物种多样性<sup>[23]</sup>;另一方面,由于生态系统为有效利用有限资源而具大量减少资源使用的特征<sup>[25]</sup>,芨芨草群落具明显分层,以长势高芨芨草为第1层,以针茅、冰草等构成具较高资源竞争力和耐性的第2层,以耐性差低矮杂草构成第3层的植物减少,从而其多样性程度较低。

一般认为,群落多样性与生产力呈正相关关系<sup>[26]</sup>。本研究两群落物种多样性差异显著,但其生物量无差异;是因为芨芨草群落中,芨芨草和赖草等植株高大,有较强竞争力,抑制其它植物生存,因此虽然其样地内物种丰富度低,但生物量较高;虽然针茅群落物种间竞争较弱,具较高丰富度,但由于该群落中的针茅等矮小,且其家畜不喜食的杂类草较多,禾草与杂类草在生物量上的补偿作用,致使群落表现为禾草和杂草生物量持平的较低生产力。因此,研究物种多样性和生产力关系时,还应考虑群落物种构成、植物种营养特性及家畜采食性。

本研究 Raunkiaer 标准频度直方图结果显示,

低物种多样性的芨芨草群落比高物种多样性的针茅群落稳定;此与史惠兰等<sup>[9]</sup>和张云飞等<sup>[8]</sup>的结果相反。其原因是:一方面,芨芨草群落中伴生种与优势和亚优势种的频度适中,而针茅群落因大量伴生种出现而抑制了针茅种群生长,使其竞争力减弱,进而使针茅群落的稳定性降低;另一方面,本研究两群落均处于退化演替阶段,在芨芨草群落退化演替初期,其优势种芨芨草维持群落主要生态功能,且对放牧和干旱扰动具较强抵抗力,但随其退化演替的进程,侵入的1~2年生植物被抗干扰能力强且能维持群落稳定性的多年生植物替代<sup>[5]</sup>,从而使群落丰富度下降;由于针茅群落处于演替的中、后期,随多年生植物的不断侵入,其物种丰富度增加,但又因其物种分布不均匀,物种间竞争加剧,使其群落稳定性降低。再者,虽然针茅群落中蒿类植物多样性较高,能提高群落稳定性<sup>[11]</sup>;但由于物种多样性与群落稳定性正效应是物种间生态位互补的结果,而研究区长期干旱少雨打乱了这种互补机制,使物种多样性对群落稳定性的正效应削弱,且针茅群落较芨芨草群落复杂,更易受干扰影响,进而导致针茅群落稳定性下降<sup>[27]</sup>。据此认为,物种功能群构成及其均匀度分布比物种多样性对群落稳定性的影响更大。因此,进行群落稳定性分析时,不能仅以物种多样性和种间关系评判,还应同时考虑群落类型、物种构成、物种分布均匀程度及群落所处生境与气候等因素。

参考文献:

[1] 杨慧茹. 青海草地早熟禾人工草地演替规律及群落稳定性研究[D]. 西宁:青海大学,2012.

[2] 韦惠兰,祁应军. 中国草原问题及其治理[J]. 中国草地学报, 2016, **38**(3):1-6+18.

WEI H L, QI Y J. Grassland problems and grassland governance in China[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2016, **38**(3): 1-6+18.

[3] 樊江文,钟华平,员旭疆. 50年来我国草地开垦状况及其生态影响[J]. 中国草地, 2002, **24**(5):70-73.

FAN J W, ZHONG H P, YUN X J. Natural grassland reclamation and its ecological impaction in recent 50 years[J]. *Grassland of China*, 2002, **24**(5):70-73.

[4] 白永飞,陈佐忠. 锡林河流域羊草草原植物种群和功能群的长期变异性及其对群落稳定性的影响[J]. 植物生态学报, 2000, **24**(6):641-647.

BAI Y F, CHEN Z Z. Effects of long-term variability of plant species and functional groups on stability of a *Leymus chinensis* community in the Xilin River Basin of Inner Mongolia[J]. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2000, **24**(6):641-647.

[5] 张继义,赵哈林,张铜会,等. 科尔沁沙地植被恢复系列上群落演替与物种多样性的恢复动态[J]. 植物生态学报, 2004, **28**(1):86-92.

ZHANG J Y, ZHAO H L, ZHANG T H, *et al.* Dynamics of species diversity of communities in restoration processes in Horqin Sandy Land[J]. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2004, **28**(1):86-92.

[6] 任继周. 草业科学研究方法[M]. 北京:中国农业出版社,1998:45-56.

[7] 沈振西,周兴民,陈佐忠,等. 高寒矮蒿草草甸植物类群对模拟降水和施氮的响应[J]. 植物生态学报, 2002, **26**(3):288-294.

SHEN Z X, ZHOU X M, CHEN Z Z, *et al.* Response of plant groups to simulated rainfall and nitrogen supply in alpine *Kobresia humilis* meadow[J]. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2002, **26**(3):288-294.

[8] 张云飞,乌云娜,杨 持. 草原植物群落物种多样性与结构稳定性之间的相关性分析[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 1997, **28**(3):130-134.

ZHANG Y F, WU Y N, YANG C. The relationship between biodiversity and structure stability among grassland plant com-

- munities[J]. *Acta Scientiarum Naturalium University Neimengol*, 1997, **28** (3): 130-134.
- [9] 史惠兰,王启基,景增春,等. 江河源区人工草地及“黑土滩”退化草地群落演替与物种多样性动态[J]. 西北植物学报, 2005, **25**(4): 655-661.
- SHI H L, WANG Q J, JING Z C, *et al.* Community succession and species diversity of manmade pratum as well as degenerated pratum on Heitutan land (Secondary Bare Land) in the area covered by the headwaters of Yellow River and Yangtze River [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2006, **25** (4): 655-661.
- [10] TILMAN D, WEDIN D, KNOPS J. Productivity and sustainability influenced by biodiversity in grassland ecosystem [J]. *Nature*, 1996, 379: 718-720.
- [11] 李昌龙,王继和,孙 坤,等. 民勤连古城自然保护区群落结构和物种多样性特征分析[J]. 西北植物学报, 2006, **26**(11): 2 338-2 344.
- LI C L, WANG J H, SUN K, *et al.* Research on species diversity and community stability of Minqin Liangucheng nature reserve[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2006, **26** (11): 2 338-2 344.
- [12] 王海东,张璐璐,朱志红. 刈割、施肥对高寒草甸物种多样性与生态系统功能关系的影响及群落稳定性机制[J]. 植物生态学报, 2013, **37**(4): 279-295.
- WANG H D, ZHANG L L, ZHU Z H. Effects of clipping and fertilizing on the relationships between species diversity and ecosystem functioning and mechanisms of community stability in alpine meadow[J]. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2013, **37**(4): 279-295.
- [13] 王 卫,张鲜花,安沙舟. 那拉提草原草地群落结构及种间关联性研究[J]. 草地学报, 2011, **19**(4): 553-559.
- WANG W, ZHANG X H, AN S Z. Grassland community structure and interspecies relationships in Nalati pasture[J]. *Journal of Grassland*, 2011, **19**(4): 553-559.
- [14] 郭 倩,王旭丽,张润霞,等. 青南牧区南部嵩草草甸群落植被构成及种间关联[J]. 草地学报, **24**(2): 294-301.
- GUO Q, WANG X L, ZHANG R X, *et al.* Analysis on vegetation composition and interspecific association of *Kobresia* meadow in southern pastoral area of southern Qinghai Province[J]. *Journal of Grassland*, **24**(2): 294-301.
- [15] 王 伟,郭 倩,康海军,等. 线叶嵩草草地群落构成及种间关联分析[J]. 西北植物学报, 2015, **35**(10): 2 096-2 102.
- WANG W, GUO Q, KANG H J, *et al.* Analysis on the vegetation composition and interspecific associations of *Kobresia capillifolia* grassland[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2015, **35**(10): 2 096-2 102.
- [16] 张继义,赵哈林. 短期极端干旱事件干扰下退化沙质草地群落抵抗力稳定性的测度与比较[J]. 生态学报, 2010, **30**(20): 5 456-5 465.
- ZHANG J Y, ZHAO H L. An example for study on vegetation stability in sandy desertification land: determination and comparison of resistance among communities under a short period of extremely aridity disturbance[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(20): 5 456-5 465.
- [17] 刘景玲,高玉葆,何兴东,等. 内蒙古中东部草原植物群落物种多样性和稳定性分析[J]. 草地学报, 2006, **14**(4): 390-392.
- LIU J L, GAO Y B, HE X D, *et al.* Biodiversity and stability of the plant communities in the middle and eastern parts of Inner Mongolia steppe[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2006, **14** (4): 390-392.
- [18] 王鲜鲜,张克斌,王 晓,等. 宁夏盐池四儿滩湿地-干草原植被群落稳定性研究[J]. 生态环境学报, 2013, **22**(5): 743-747.
- WANG X X, ZHANG K B, WANG X, *et al.* Vegetation stability of the siertan wetland-dry grassland in Yanchi, Ningxia [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2013, **22** (5): 743-747.
- [19] 刘珏宏,高 慧,张丽红,等. 内蒙古锡林郭勒草原大针茅-克氏针茅群落的种间关联特征分析[J]. 植物生态学报, 2010, **34**(9): 1 016-1 024.
- LIU Y H, GAO H, ZHANG L H, *et al.* Comparative analysis of interspecific association with in the *Stipa grandis*-*S. krylovii* community in typical steppe of Inner Mongolia, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, **34** (9): 1 016-1 024.
- [20] 覃 林. 统计生态学[M]. 北京:中国林业出版社, 2009: 81-97.
- [21] 郭水良,于 晶,陈国奇. 生态学数据分析—方法、程序和软件[M]. 北京:科学出版社, 2015: 56.
- [22] 秦建蓉. 宁夏东部风沙区荒漠草原植物群落及物种多样性研究[D]. 银川:宁夏大学, 2016.
- [23] 谢应忠,凌佐志. 干旱区草地退化过程中群落物种多样性研究[J]. 宁夏农学院学报, 2003, **24**(4): 14-17.
- XIE Y Z, LING Z Z. Species diversity of deteriorated grassland in the dry area[J]. *Journal of Ningxia Agriculture College*, 2003, **24** (4): 14-17.
- [24] 白永飞,邢雪荣,许志信,等. 内蒙古高原针茅草原群落  $\beta$  多样性研究[J]. 应用生态学报, 2000, **11**(3): 408-412.
- BAI Y F, XING X R, XU Z X, *et al.*  $\beta$ -diversity of *Stipa* communities in Inner Mongolia plateau[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, **11** (3): 408-412.
- [25] CARPENTER S R. Drivers and Dynamics of Changes in Biodiversity. United Nations Environment Programmer (UNDP) (ed.), Global Biodiversity Assessment[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996: 311-318.
- [26] 王长庭,龙瑞军,王启基,等. 高寒草甸不同草地群落物种多样性与生产力关系研究[J]. 生态学杂志, 2005, **24** (5): 483-487.
- WANG C T, LONG R J, WANG Q J, *et al.* Relationship between species diversity and productivity in four types of alpine meadow plant communities[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, **24**(5): 483-487.
- [27] PFISTERER A B, SCHMID B. Diversity-dependent production can decrease the stability of ecosystem functioning[J]. *Nature*, 2002, **416**(6): 84-86.